

# 注水系统三级节流降噪设计及数值分析

方 超, 马士虎, 蔡标华, 俞 健

(武汉第二船舶设计研究所, 湖北武汉 430064)

**摘要:** 大压差工况下, 流量调节阀的节流作用导致自流注水系统振动噪声问题突出。为控制自流注水系统的噪声, 从系统配置的角度进行系统降噪优化设计, 提出了多级节流的降噪方案。采用流体动力学数值方法进行了多级节流低噪声设计原理分析, 验证了多级节流降噪方案的有效性。基于低噪声设计原理, 设计了三级流量调节阀串联的节流注水方案, 并对三级节流系统进行了流场数值分析, 数值分析结果表明: 三级节流设计使各级阀后低压区减小, 避免了阀后局部气蚀出现; 一级阀门和二级阀门进口下缘及出口上缘均出现大尺度的漩涡结构, 为主要噪声源区域。

**关键词:** 流量调节阀; 三级节流; 振动噪声; 流场计算

中图分类号: TB533+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-03-0277-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.015

## Three stage throttling noise reduction design and numerical analysis of water injection system

FANG Chao, MA Shi-hu, CAI Biao-hua, YU Jian

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, Hubei, China)

**Abstract:** Under the condition of high pressure difference, the throttling effect of flow control valve results in the problem of vibration and noise. In order to control the noise of the water injection system, this paper makes a low noise optimization design from the viewpoint of system configuration and proposes a noise reduction scheme for multistage throttling. The principle of low noise design is analyzed by numerical method of fluid dynamics, which verifies the effectiveness of the multilevel throttling scheme. Based on the principle of low noise design, three stage flow control valves in series are designed to control the flow in this paper. Then the paper numerically analyzes the flow field and sound field, and the analysis results indicate that the three stage throttling design makes the low pressure area smaller and the local cavitation reduced behind valves, a large scale vortex structure appears at the lower edge of the inlet and the upper edge of the outlet of the first two stage valves.

**Key words:** flow control valve; three stage throttle; vibration noise; flow field calculation

## 0 引 言

自流注水系统利用舷外和舱内压力差对水舱进行自流注水达到均衡船舶浮力变化的目的。传统注水系统采用单级流量调节阀控制注水流量, 在高压差条件下, 系统内部流体紊流度高, 气蚀现象严重, 系统整体噪声级较高, 对于总体环境有不利影响, 迫切需要治理和改善。

国内外研究者在海水系统噪声治理方面进行了大量研究, 工程实际中采取的降噪措施主要有多级节流、分散流道、迷宫式流道等<sup>[1-2]</sup>。戴根华等<sup>[3]</sup>

提出了利用多孔板结构降低系统气蚀噪声; Y Liu 等<sup>[4]</sup>以单级节流孔、二级节流孔以及三级节流孔作为研究对象, 在系统背压相同、进口压力不同的实验条件下研究其空化特性, 结果表明, 空化程度与节流孔级数和工况压力都密切相关; 吴杰<sup>[5]</sup>进行了多级降压高压差调节阀的设计, 阀芯采用串级降压的形式, 降低了调节阀噪声。目前, 研究涉及多种管路系统和噪声治理方法, 但是较少见利用多级流量调节阀串联进行系统噪声治理的文献报道。

本文重点分析了高压差自流注水系统噪声产生的机理, 从系统配置的角度提出了三级阀门串联节流的优化设计方案, 并建立简单二维模型对三级节流的低噪声设计原理进行了分析, 验证了三级节流降噪方案的有效性。基于三级节流的低噪声设计原理, 对自流注水系统三级节流结构进行了设计, 最后运用计算流体力学的方法对三级节流系统进行流场数值分析。

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509192)

作者简介: 方超(1991-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为船舶机械装置及系统。

通讯作者: 马士虎, E-mail: 1579416524@qq.com.

## 1 注水系统噪声源及机理分析

如图 1 所示,注水系统主要由管道、阀门以及浮力调整水舱等部分组成。根据注水系统设计运行工况要求,系统在 1.8 MPa 的高压差条件下采用单级阀门节流完成注水动作。

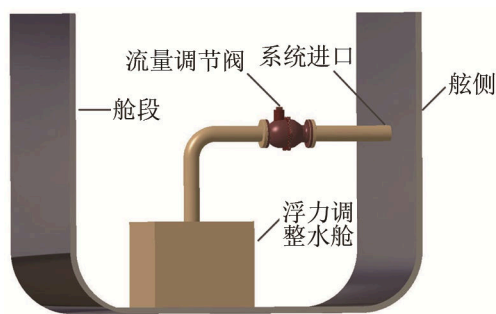


图 1 自流注水系统原理图

Fig.1 Principle diagram of single stage throttling system

在高压差条件下,由于注水系统阀门的节流作用,海水介质通过阀门时流速迅速增大,海水介质压力降低,当海水介质压力低于蒸汽饱和压力时,海水介质发生空化,产生强烈的空化噪声。同时,在阀门前后高压差条件下,系统内部流动状态复杂,紊流程度高,湍流噪声显著。空化噪声与湍流噪声是自流注水系统的主要噪声源。

按照国际电工委员会发布的《IEC 60534-8-3:2000》标准中阀门-噪声的相关描述,阀门噪声主要与阀门流量、阀门前后压差、流体介质密度以及阀门是否空化等密切相关。注水系统流量一定时,可通过降低阀门压差抑制阀门噪声。通过上述分析可知,宜采用多级阀门串联逐级降压的技术方案对自流注水系统阀门空化噪声和湍流噪声进行治理。

## 2 三级节流降噪设计原理

通过将三级流量调节阀串联可提高单级流量调节阀下游压力,减小单级阀门压差,避免阀门下游流体气蚀,抑制气蚀噪声,同时可有效减小小流体壁面压力脉动和湍流强度,降低湍流噪声。

为说明三级节流的低噪声设计效果,本文建立结构简单的二维模型进行计算对比。根据多级节流设计原则<sup>[6]</sup>,各级节流压降按照几何级数递减设计,因此,三级节流系统各级阀门开度逐级递增。由于三级节流孔串联的降噪原理与三级阀门串联的降噪原理相同,模型中以直径逐级增大的节流孔替代

开度逐级增大的调节阀作为阻力元件。目前尚无合适的模型可用于计算流体空化,但是流场压力分布可间接反映流体空化与否及空化程度,可对空化噪声及湍流噪声进行定性分析及评价。因此本文采用二维大涡模拟模型监测流场压力脉动,通过压力脉动对比,对三级节流的降噪效果进行评价。

如图 2 所示,模型-1 为单级节流网格模型,出流和入流管段直径为 100 mm,节流孔径为 29.5 mm,孔长 100 mm;模型-2 为三级节流网格模型,出流和入流直径为 100 mm,第一级节流孔径为 35mm,第二级节流孔径为 37.5 mm,第三级节流孔径为 43 mm,三级节流孔孔长均为 100 mm。模型-1 和模型-2 的几何尺寸均由数值试验确定,试验的目标是使模型-1 和模型-2 具有相同的阻力系数。进出口分别设置为压力进口和速度出口,其中进口压力设为 1.8 MPa,出口速度设为  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,沿流向取 3 个监测点 P1、P2、P3。

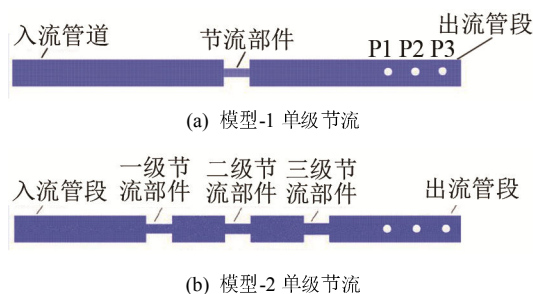


图 2 三级节流低噪声设计验证模型

Fig.2 Validation models for the low noise design of three stage throttling

图 3 为运用二维计算流体动力学方法得到的模型-1 和模型-2 各监测点的脉动压力幅值。由模型-1 和模型-2 对比可知,在相同的阻力系数下,三级节流三个测点 P1、P2、P3 脉动压力幅值均较单级节流减小 15 dB(参考压力为  $10^{-6} \text{ MPa}$ )以上。由此可知,采用三级阀门串联的节流注水方案符合低噪声

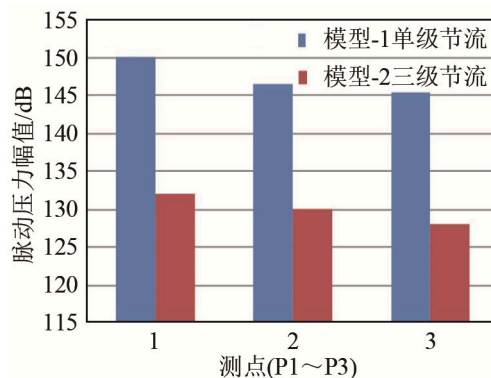


图 3 模型-1 和模型-2 监测点脉动压力计算结果

Fig.3 Pulsing pressure CFD results at monitoring points of model-1 and model-2

设计要求。

### 3 三级节流注水系统数值分析

#### 3.1 注水系统三级节流设计模型

基于三级节流低噪声设计原理，完成了自流注水系统三级节流的结构设计，注水系统由三台球阀串联共同调节系统注水流量，如图4所示。



图4 注水系统三级节流结构

Fig.4 Three stage throttling structure of water injection system

注水系统进出口及阀门之间管道内径均为100 mm，流量调节阀类型为球阀，阀芯通径为80 mm。一定工况下，为使三级注水系统与单级注水系统具有相同的注水流量，三级节流系统各阀门总阻力系数应与单级节流系统阀门阻力系数相同，因此，注水时增大三级节流系统各级阀门开度，并且逐级增大，可有效降低阀门内的流体流速，避免各级流量调节阀后发生气蚀。

#### 3.2 三级节流管路流场特性分析

##### 3.2.1 计算网格模型及参数设置

注水系统三级节流模型阀门附近结构复杂，管道结构简单，为兼顾计算效率和计算精度，采用混合网格划分方案，阀门附近采用非结构化网格且网格适当细化，管道处采用结构化网格且网格略微粗化。如图5所示，计算区域从左至右分为入流、一级节流阀、中间管段-1、二级节流阀、中间管段-2、三级节流阀、出流七个部分，网格总数为424万，其中入流包含77万六面体网格，一级节流阀包含50万四面体网格，中间管段-1包含78万六面体网格，二级节流阀包含51万四面体网格，中间管段-2包含28万六面体网格，三级节流阀包含50万四面体网格，出流包含90万六面体网格。

本文选取进出口压差为1.8 MPa、流量为120 t·h<sup>-1</sup>的典型大压差工况进行仿真计算，三级阀门开度由数值试验确定，分别为40°、50°、60°，阀门阻力系数依次减小，开度逐级增大。进口边界条件设为速度入口，速度为4.244 m·s<sup>-1</sup>，出口边界条件设为压力出口，压力为0。计算湍流模型选择大涡模拟模型，为保证边界层的计算精度，边界层网格经过多次调整保证 $y^+ \approx 1$ ，同时经过网格无关性验证，计算残差曲线收敛良好，满足计算精度要求，

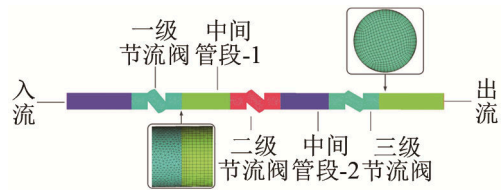


图5 整体网格模型

Fig.5 Total CFD mesh for three stage throttling water system

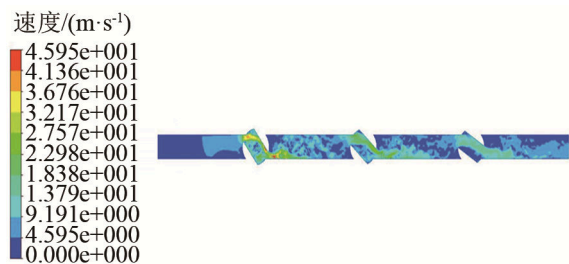
因此网格划分是合理的。

##### 3.2.2 流场特性计算结果分析

三级节流注水系统压力和速度分布如图6所示。由压力分布云图6(a)可以看出，从入流到出流沿轴向压力逐级降低，阀门前后压差减小，且一级节流阀至三级节流阀压降依次变小。一级至三级节流阀后均出现局部压力降低，但未降至饱和蒸汽压力以下，三级节流系统未出现空化现象，原因是后级阀门对上级阀门形成压力阻塞作用，使流体介质的流速降低，平稳降压，抑制了低压区域的形成，这也说明了三级节流抑制空化现象的有效性。由速度分布云图6(b)可以看出，阀门附近速度梯度较大，流动不均匀变强。注水系统后续的进一步优化设计应集中在控制阀门附近流动不稳定性上。



(a) 压力分布



(b) 速度分布

图6 三级节流系统横截面流动特性

Fig.6 Flow dynamics characteristics on the cross section of three stage water injection system

三级节流注水系统速度矢量分布规律如图7所示。由速度矢量分布图可以看出，由于阀门进口上缘和出口下缘流体突然加速，阀门进口下缘和阀门出口后方出现大尺度的漩涡结构，而根据涡声理论<sup>[7]</sup>，漩涡是流噪声的主要来源<sup>[8-9]</sup>。一级和二级节

流阀后均未出现单级节流时常出现的卷吸现象<sup>[10]</sup>,射流现象明显减弱,原因是后级阀门对上级阀门形成了一定的阻塞作用,中心流域流体对外周流域的卷吸作用被抑制,涡量和漩涡强度进一步减小,三级节流使注水系统的湍流噪声被有效抑制。

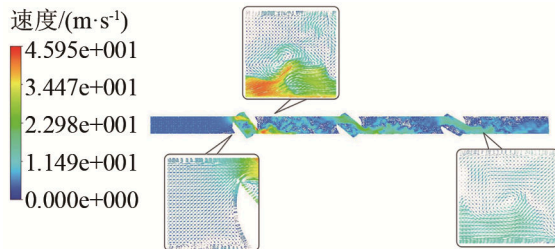


图7 三级节流注水系统速度矢量分布规律

Fig.7 Velocity vector distribution in the water injection system of three stage throttling

## 4 结 论

本文分析了注水系统噪声源及噪声产生机理,基于系统噪声产生机理,提出了三级节流的降噪方案,建立简单的二维模型并采用计算流体力学的方法对三级节流的设计原理进行验证。最后给出了注水系统三级节流的设计模型,并选取典型工况进行了流场数值分析,得到了以下结论:

(1) 三级节流设计使阀后低压区减小,阀后压力高于饱和蒸汽压力,阀后局部汽蚀被有效抑制,避免了空化噪声的产生;

(2) 后级阀门的阻塞作用使阀后射流现象有所减弱,涡量和漩涡强度减小,注水系统的湍流噪声被抑制;

(3) 三级节流注水系统的一级节流阀和二级节流阀的进口下缘和出口上缘均出现大尺度的漩涡结构,是系统的主要噪声源区域,后续优化设计中应予以考虑。

## 参 考 文 献

- [1] CERUTTI S, KNIO O M, KATZ J. Numerical study of cavitation inception in the near field of an axisymmetric jet at high Reynolds number[J]. *Physics of Fluids*, 2000, **12**(10): 2444-2460.
- [2] LIU L, ZHAO J. Multistage throttling characteristics of reverse direction impact of pilot operated check valve[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2016, **18**(3): 1874-1883.
- [3] 戴根华, 王宏玉, 李沛滋. 低噪声阀门设计原理及阀门噪声控制[J]. *噪声与振动控制*, 1985, **5**(5): 23-25, 29.  
DAI Genhua, WANG Hongyu, LI Peizi. Design principle of low noise valve and valve noise control[J]. *Noise and Vibration Control*, 1985, **5**(5): 23-25, 29.
- [4] LIU Y, YANG Y, LI Z. Research on the flow and cavitation characteristics of multistage throttle water-hydraulics[J]. *ARCHIVE Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering Part E Journal of Process Mechanical Engineering* 1989-1996, 2006, **220**(2): 99-108.
- [5] 吴杰. 多级降压高压差调节阀设计[J]. *阀门*, 2001, **10**(1): 5-8.  
WU Jie. Design of multi stage high pressure difference control valve [J]. *VALVE*, 2001, **10**(1): 5-8.
- [6] 张宝峰. 多级节流孔板的设计计算[J]. *陕西电力*, 2005, **33**(5): 27-28.  
ZHANG Baofeng. Design and calculation of multistage orifice plate [J]. *Northwest Electric Power Technology*, 2005, **33**(5): 27-30.
- [7] POWELL A. Theory of vortex sound[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, **32**(8): 982-990.
- [8] 王春旭, 吴崇建, 陈乐佳, 等. 流致噪声机理及预报方法研究综述[J]. *中国舰船研究*, 2016, **11**(1): 57-71.  
WANG Chunxu, WU Chongjian, CHEN Lejia, et al. A comprehensive review on the mechanism of flow-induced noise and related prediction methods[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, **11**(1): 57-71.
- [9] 李环, 刘聪尉, 吴方良, 等. 水动力噪声计算方法综述[J]. *中国舰船研究*, 2016, **11**(2): 72-89.  
LI Huan, LIU Congwei, WU Fangliang, et al. A review of the progress for computational methods of hydrodynamics noise [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, **11**(2): 57-71.
- [10] 杨元龙, 郑文. 船用大压降给水管道多级孔板设计及节流特性研究[J]. *船海工程*, 2015, **44**(3): 164-167.  
YANG Yuanlong, ZHENG Wen. Design of the multistage orifice plate and throttle characteristics for marine feed pipe with large pressure drop [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2015, **44**(3): 164-167.